第1章　高速の無線データ伝送に使われる技術と規格の変遷を眺める

最近の無線通信動向とアダプティブ・アレイ・アンテナの技術

Minseok Kim

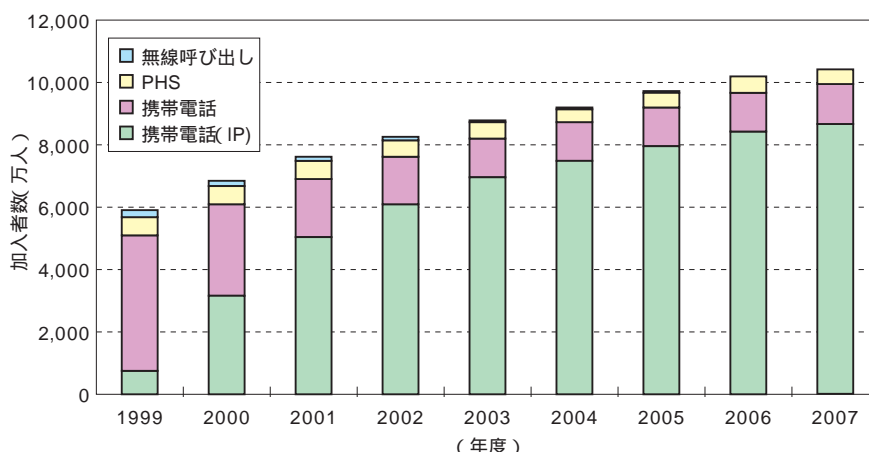
メールやインターネットといった，データ通信に比重が移りつつある携帯電話であるが，ここでは，より多くの人がアクセスできるように，なおかつ高速なデータ通信を行えるようにするための方策を探る．この実現には，アダプティブ・アレイ・アンテナ技術が欠かせない．この章では，その基礎的な考え方を紹介する．（編集部）

世界の移動通信市場は，1990年の後半から爆発的に成長し，国内の携帯電話（PHSを含む）の加入者数は2007年9月現在，1億人を超えています．世界的に2010年頃には34億人に達すると予想されています．

従来，携帯電話は音声通話用として主に利用されていました．しかし，**図1**のように最近はマルチメディア・データ通信（IP通信）にウェイトが移り，その利用形態も大きく変化しています．もっと多くの加入者を収容（チャネル容量の改善）したい，もっと高速なデータ通信を行いたいといった要望に対して，さまざまな技術が登場してきました．この実現には，非常に制限された周波数資源をいかに効率的に利用するかが本質的な問題となっています．

本特集で紹介するアダプティブ・アレイ・アンテナ（適応アレイ・アンテナ；Adaptive Array Antenna）技術[注1]は，複数のアンテナを用いて信号をうまくやりとりする，いわゆる空間信号処理を行う技術です．この技術は，これからの移動通信分野において大きく注目されるものの一つです．このような技術を用いることで，モバイル環境での無線接続がもっとも身近になり，高度なワイヤレス環境を誰もが簡単に使える新たな時代が到来するだろうと期待されています．

注1：日本以外の国ではスマート・アンテナ（Smart Antenna）という場合が多い．

図1
PHS，無線呼び出し，携帯電話および携帯電話からのインターネット利用者数の推移
2007年度9月末の数字，それ以外は年度末の数字（電気通信事業者協会資料より作成）

KeyWord　アダプティブ・アレイ・アンテナ，移動通信，セルラ・システム，GSM，PDC，W-CDMA，CDMA2000，無線LAN，MIMO，OFDM

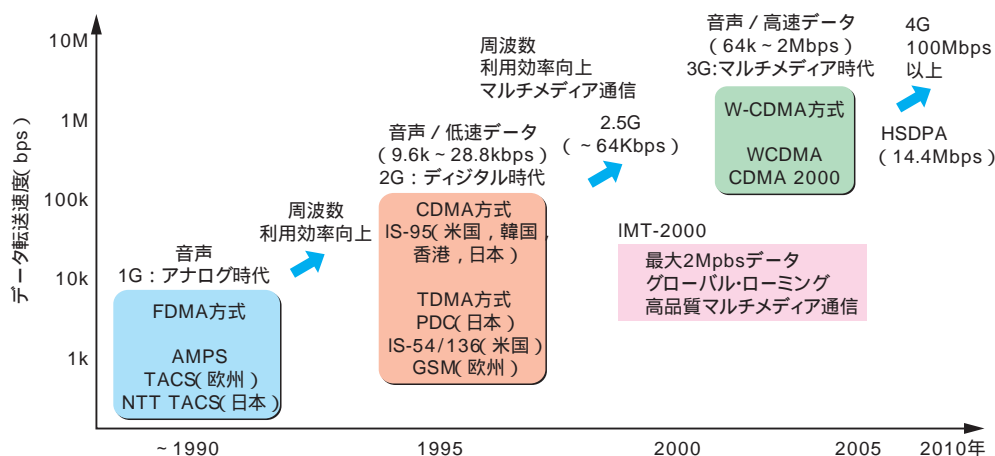



図2 セルラ・システム（携帯電話）の発展

1．移動通信システムの発展

● 第1世代から現行の第3世代までのセルラ・システム

移動通信システムは図2のように，だいたい10年周期で起こる技術的なブレイクスルーに伴い，新しい方式が登場してきました．

第1世代（1G：1st Generation）と呼ばれるセルラ・システム（携帯電話）は，アナログ方式による音声のみのサービスでした．1990年代の第2世代（2G：2nd Generation）セルラ・システムでは，欧州のGSM（Global System for Mobile Communications）や日本のPDC（Personal Digital Cellular）に代表されるディジタル方式による音声通話と，9.6k～64kbps程度の低速データ通信サービスが主に提供されました．その後，携帯電話からのインターネット接続によるIP（Internet Protocol）データのトラフィックの急増に伴い，音声・画像・動画データなどのマルチメディア情報をより高速に伝送できる，W-CDMA（Wideband Code Division Multiple Access）やCDMA 2000に代表される第3世代（3G：3rd Generation）セルラ・システム（これがいわゆるIMT-2000[注2]と呼ばれる）が登場しました．国内では世界で最も早く2001年10月から商用化され，現在，主に使われています．第3世代システムでは，最大2Mbps（実際には64K～384Kbps）のより高速なデータ通信が可能になりました．

携帯電話システムにおいては，より多くのユーザを収容し，高速・大容量データ通信を実現するためにさまざまな技術が開発されてきました．例えば，時間分割多重（TDMA：Time Division Multiple Access），コード分割多重（CDMA：Code Division Multiple Access）といった多重アクセス方式の導入による周波数の利用効率の向上が挙げられます．そのほかに変復調技術，誤り訂正符号技術，符号化技術，チャネル等化技術によるマルチパス・フェージング対策や干渉抑圧技術が考案されてきました．

3Gシステムは電気通信および放送の世界標準案を勧告する国連団体のITU（International Telecommunication Union）により，世界的に共通な無線周波数の使用などグローバルな標準を目指して提案されました．特徴としては，高速データ通信，高品質音声サービス，非対称トラヒックに柔軟に対応できるマルチメディア・サービス，世界的なローミングが挙げられます．

● これからの第4世代の移動通信システム

これから2010年頃には，第4世代（4G）という移動通信システムがサービスされると期待されています．そのとき，最大1Gbpsの超高速通信の実現も夢ではありません（図3）[(1)]．

その一方，IEEE 802.11ワーキング・グループで標準化が進められている無線LAN（Local Area Network）は，IEEE 802.11b（2.4GHz帯）が爆発的に普及しました．OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiple Access）技術を用いてより高速なデータ伝送を実現した5.2GHz帯のIEEE 802.11a（34～54Mbps）や2.4GHz帯のIEEE 802.11gも登場しており，家庭やオフィスの屋内環境で数十Mbpsの高速伝送が可能となっています．

また，IEEE 802.11では，次世代無線LANシステムとし

注2：International Mobile Telecommunication-2000の略．

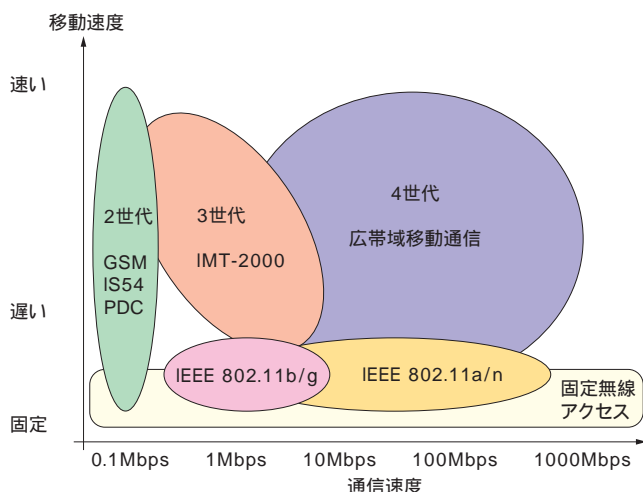



図3　新世代移動通信システムの領域

てMIMO（Multiple Input Multiple Output）とOFDM技術により65M～600Mbpsの高速伝送が可能なIEEE 802.11nの標準化が進められており，現在ドラフト案を採択している状況です．

このように最終的な標準案は2008年頃に確定される見込みですが，多くの電子機器メーカは既にドラフト案に基づいた無線LAN製品を発売しています．IEEE 802.11仕様の無線LANに対しては，Wi-Fi Alliance（Wireless LAN Fidelity Alliance）が各業界へのプロモーションとともに，相互接続検証，仕様準拠製品認定を行っています．IEEE 802.11nについてはまだドラフト状態ですが既に製品化が活発に進められているため，今年6月からは正式に認定を行うということです．それぞれの規格の仕様上の特徴を**表1**に示します．

2．移動通信システムは今後どう変わっていくのか

次世代移動通信システムは，第3世代に続く第4世代とも呼ばれています[(2),(3)]．

「IMT-2000」と呼ばれる第3世代移動通信では，国際的なローミングや，高速移動時144Kbps，歩行時384Kbps，静止状態2Mbpsという通信速度，音声・画像・動画などのマルチメディア・サービスの提供が目的でした．それでは，次世代移動通信は第3世代とは何が違うのでしょうか．また，どう定義されるのでしょうか．

図3は，新世代移動通信システムの領域を，通信速度と移動速度の関数で表しています．基本的には現在の音声とパケット・データ通信から，100Mbps～1Gbpsのデータ伝送速度をベースにした有線・無線が統合されたIPベース・マルチメディア・サービスの形態になります．しかし，実は次世代移動通信の究極の目標は高速の伝送速度だけではなく，むしろ，ユビキタス・サービス[注3]を提供するためのプラットホームを構築することです．

IMT-2000の導入後，ITUではIMT-2000の将来の拡張や，次世代システムの検討に移り，無線部門（ITU-R）は1999年11月にスタディ・グループ8（SG8）の中にワーキング・パーティ8F（WP8F）を設置することになりました．

WP8Fは2005年10月にフィンランドで開催された会合で2010年頃サービスされる移動通信システムを「IMT-

注3：ユビキタス（Ubiquitous）は，ラテン語源で「いたるところに存在する」という意味．インターネットなどの情報ネットワークに，「いつでも，どこからでもアクセスできるモバイル環境」をいう．

表1　IEEE802.11無線LANの仕様

規　格	動作周波数	変調方式・アクセス方式	最大転送速度	通達距離	基準承認	チャネル数（うち同時使用可能数）	特　徴
IEEE 802.11b	2.4GHz帯（2.400G-2.497GHz）	DSSS CSMA/CA	11Mbps	○	1999年9月	14（3）	・低速での利用 ・無線LANスポットの主流規格
IEEE 802.11g	2.4GHz帯（2.400G-2.484GHz）	OFDM CSMA/CA	54Mbps	○	2003年6月	13（3）	・屋内外 ・IEEE802.11bの端末と共存
IEEE 802.11a	5GHz帯（5.150G-5.250GHz）	OFDM CSMA/CA	54Mbps	△	1999年9月	4（4）	・屋内屋外使用禁止） ・直進性：遮蔽物が少ない環境が有利
IEEE 802.11n	5GHz帯	MIMO-OFDM CSMA/CA	65M～600Mbps	△	2008～2009年予定 現在はドラフトv2（2007年3月）	4（4）	・MIMO-OFDM ・ドラフト仕様

Advance」として定義しました，第4世代の移動通信システムの技術的な規格の標準化について活発な検討が行われています[4]．日本国内においても，2001年に総務省情報通信審議会の新世代モバイル委員会が将来の移動通信システムのビジョンについてまとめており，我が国における次世代向けの研究開発が既に始まっています．

未来社会はさまざまなモバイル環境で無線アクセスがさらに身近なものになり，誰でも何でも手軽にワイヤレス・ネットワークに繋ぐことが可能な時代が到来すると期待されています．

情報通信インフラが常に利用でき，経済・社会・文化の基盤となるユビキタス社会に進化していくと考えられます．

次世代の移動通信システムでは，データ通信の高速化や通信容量の増大を目的とした研究開発が行われる一方で，人と機械，機械と機械との通信が手軽に行われ，センサをはじめとする機械やモノも対象にしたネットワークそれぞれがシームレスに繋がるネットワーク環境，すなわち「ユビキタス・ネットワーク」の実現が期待されます．ここで，ブレーク・スルー的な無線伝送技術の重要性は一層高まっています．

3．複数のアンテナを用いれば「空間」というもう一つの次元が使える

次世代移動通信システムでチャネル容量の増大や目標としている100Mbps～1Gbpsの高速データ通信の実現に向けて，限られた周波数資源の利用効率をさらに向上する画期的な技術の導入が必要になります．

無線通信においてアンテナから放射された電波は，一般に全方向にわたって伝搬します．空間というメディアをすべての人が共有する形になります．そのため，複数の人がお互いに干渉しないで使い合う方法として周波数分割，時間分割，コード分割などの多重技術を導入してきたわけです．ここで，複数のアンテナを用いれば空間次元での信号処理を行えます．

図4はアダプティブ・アレイ・アンテナを用いた受信システムの基本概念です．各素子で受信された信号はそれぞれ周波数変換など受信処理を行います．次に通信環境に最適な重み係数を推定します．これを用いて位相と振幅を適切に制御することで，出力品質が最高になるように合成します．**図5**のように必要な信号のみを受信でき，さらに受信信号の合成による利得が得られます．

要するに，アダプティブ・アレイ・アンテナは，干渉波を抑圧しマルチパス遅延波をうまく合成するための信号処理技術です．通信環境をうまく推定し，そのときに最適な受信制御を実時間で行うことで，同じ周波数，同じ時刻でも通信する場所さえ異なれば，互いに混信せず通信できます．これが空間領域多重方式(SDMA：Spatial Division Multiple Access)の基本的な考え方です．

アレイ・アンテナ信号処理技術の一つであるMIMO(Multiple Input Multiple Output)システムは，特に送信側と受信側双方が複数のアンテナを用いる技術です．送受信間に空間多重信号処理(SDM：Space Division Multiplexing)を行うことで，マルチストリーム伝送が可能になり，さらに転送効率を向上させられる伝送技術です(**図6**)．

MIMOシステムは伝送路を互いに干渉しない複数の伝送

図4 アダプティブ・アレイ受信機の基本概念

(a) ユーザAのみを受信

(b) ユーザBのみを受信

図5 信号を選択するしくみ

（a）MIMOシステムの構成

（b）4素子アンテナを用いた4ストリームMIMO伝送のイメージ：空間を4チャネルに分離できる

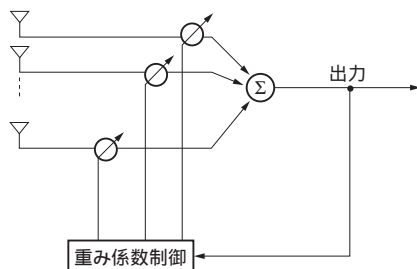
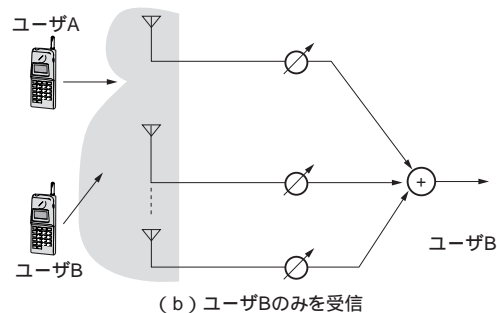
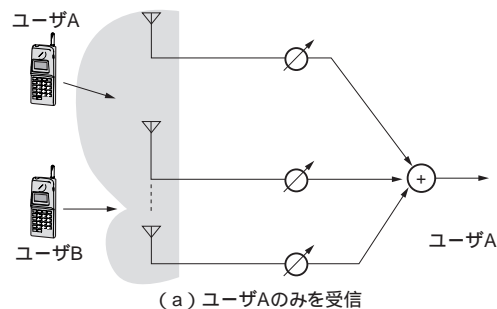
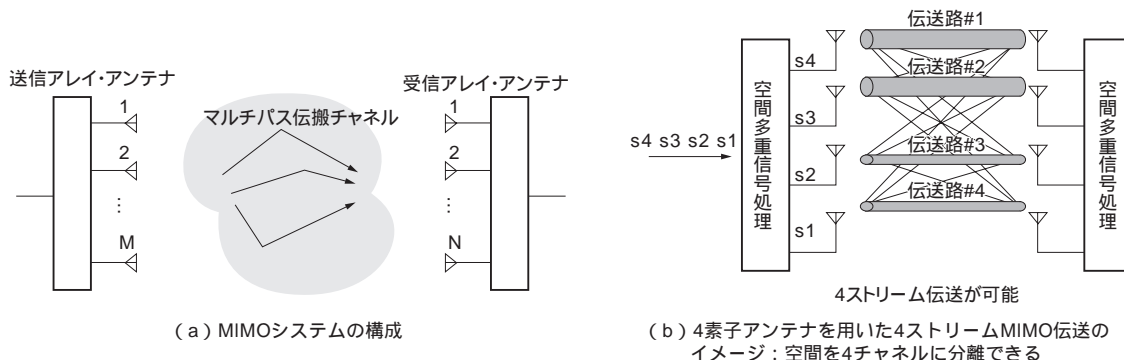



図6 MIMOシステムにおける空間多重伝送の基本概念(5)

路（チャネル）に分離することを意味します．このようにMIMOシステムは追加的な周波数や送信電力の割り当てを行わず，チャネル容量をアンテナ数（送受信アンテナ数が同じ場合）に比例して増加させることが可能です(6)．次世代移動通信システムで要求される高スループットを達成するには欠かせない技術として研究開発が行われています．

MIMOシステムは，複数のアンテナを用いることから生じる高コストやリアルタイムな行列計算による高い信号処理能力の要求など，その実現にはさまざまな問題があります．しかし，これからの通信システムで次々と取り入れられると考えられます．

4．アダプティブ・アレイ・アンテナ，MIMO技術を取り巻く業界の動向

アダプティブ・アレイ・アンテナやMIMO技術は，信号処理能力を揃えれば既存のシステムにそのまま適用して性能を向上させられます．この場合，特にMIMOの空間多重伝送（MIMO-SDM）技術は，回線容量を1けた向上させる唯一の方法であるといっても過言ではありません．

それでは，アダプティブ・アレイ・アンテナ，MIMO技術を取り巻く無線業界の動向についてIEEE 802標準化動向（**図7**）を中心に紹介します．

● 無線LAN（IEEE 802.11）

超高速マルチメディア通信の需要は無線LAN環境においても益々高まっています．無線LANは，家庭用ネットワークやオフィスなどの主に屋内環境で用いられるため，MIMO伝送の性能発揮に適したマルチパス環境です．無線端末になるパソコンに複数のアンテナを設置する場合にスペース的な問題がないので，最も適用しやすい分野です．

MIMO伝送技術を無線LANに取り入れようとする動きは，IEEE 802ワーキング・グループで行っているIEEE 802.11nの標準化活動であり，現在はドラフト案を規定して技術的検証を行っています．家庭，オフィス，ホットスポット・ネットワーク市場の成長に従い，標準規格の確定前にも関わらず市場の主導権を先占するために多くのメーカからチップセットや無線LAN製品が販売されています．

図7 IEEE802の標準化動向

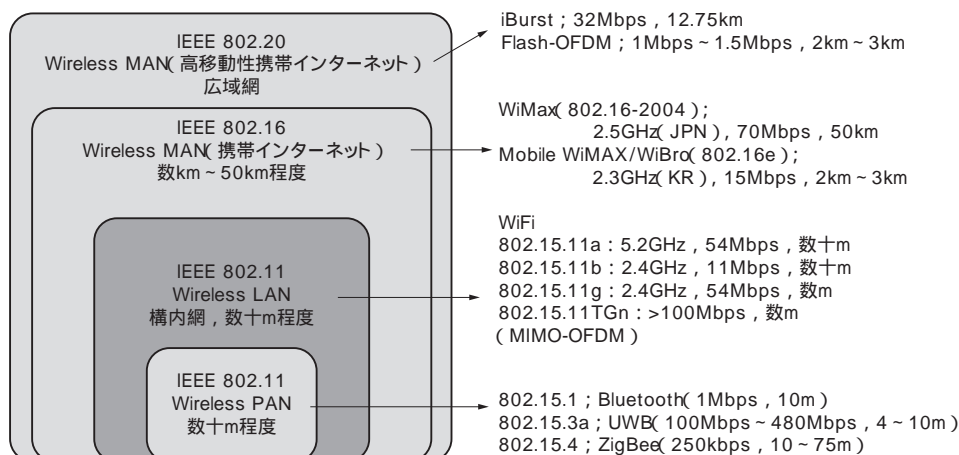



表2
IEEE802.11n ドラフト仕様(v1)

注：ガード・インターバルは，マルチパスの干渉を低減するためにデータを送信しない間隔のこと．標準の800nsのほか，オプションで400nsが選択できる．

伝送方式	IEEE802.11 a/g	IEEE802.11n	
		必須事項	選択事項
最大伝送速度［Mbps］	54	130	600
帯域幅［MHz］	20	20	40
OFDMサブキャリア数（データ＋パイロット）	52（48＋4）	56（52＋4）	114（108＋6）
空間多重数	1	1～2	1～4 Tx BF，STBC
Channel Coding	Convolution Code 1/2, 2/3, 3/4	Convolution Code 1/2, 2/3, 3/4, 5/6	LDPC 1/2, 2/3, 3/4, 5/6
変調方式		BPSK/QPSK/16-QAM/64-QAM	
ガード間隔（GI注）［ns］	800	800	400

IEEE 802.11nのドラフト案の主な仕様を既存のIEEE 802.11aと比較したのが**表2**です．IEEE 802.11nの物理層（PHY）は多重アンテナの使用や送信ビーム形成，デュアル・バンド（2.4GHz/5GHz）をサポートし，またIEEE 802.11a/gとの互換性を保障します．必須事項において20MHzの帯域で2ストリーム（送信アンテナ2個，受信アンテナ2個）を64QAMで変調しOFDM伝送する場合，理論上最大130Mbpsの伝送速度になります．選択事項において40MHzの帯域で4ストリーム（送信アンテナ4個，受信アンテナ4個）を64QAMで変調しOFDM伝送する場合，理論上最大600Mbpsの性能が得られることになります．

● IEEE 802.20とWiMAX（IEEE 802.16e）

無線LANより広い領域をカバーする無線MAN（Metropolitan Area Network）においてIEEE 802ワーキング・グループでは，第4世代の移動通信規格としてIEEE 802.20（通称，MBWA：Mobile Broadband Wireless Access）という移動体も含めた高速大容量の無線データ通信規格の標準化を進めています[8].この規格は無線LAN技術の限界であった移動性やカバー・エリアの問題を乗り切るために提案され，携帯インターネットの概念として米国Qualcomm社が主導しています．

その一方，IEEE 802.16という固定無線アクセス向けの規格から移動体通信向けに拡張したIEEE 802.16e（モバイルWiMAX）も標準化が進んでいます．韓国では2.3GHz帯のWiBroという規格として2006年6月から実運用されています[7]．IEEE 802.20とIEEE 802.16は無線MAN市場の標準規格として激しい競争が予想されます．

このような技術も基本的には周波数利用効率の向上を図るためにOFDM技術，空間多重やダイバシチ効果を得るためのアダプティブ・アレイ・アンテナやMIMO伝送技術を積極的に取り入れることが前提とされています．

参考・引用*文献

(1) 笹瀬巌；次世代移動通信の動向，オペレーションズリサーチ学会誌，2004年8月号．
(2) 大矢ほか；Beyond 3Gに向けた技術及び標準化動向，MWE2005 workshop digest.
(3) 新世代移動通信システムの将来展望，http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/bunkakai/abstract.pdf.
(4) ITU-R WP8F,“*Preliminary Draft New Recommendation（PDNR）: Vision Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT-2000 and of Systems beyond IMT 2000,*”June 2002.
(5) 唐沢好男；MIMOのふしぎ探検 －千手観音同士がキャッチボールをすると－，電興技報，No. 40, 2006
(6) G. J. Foschini,“*Layered Space-time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment when Using Multi-element Antennas,*”Bell Labs Technical Journal, Oct. 1996, pp. 41-59.
(7) IEEE P802.16e/D12, Draft IEEE Standard for and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems, Oct. 2005.
(8) IEEE 802.20 Working Group on Mobile Broadband Wireless Access, MBFDD and MBTDD: Proposed Draft Air Interface Specification, Jan. 2006.

Minseok Kim
東京工業大学

<筆者プロフィール>

金 旼錫（きむみんそく，Minseok Kim）韓国Hanyang大学 電気工学科卒．横浜国立大学 大学院 博士課程修了．工学博士．組み込み系の会社を経て，現在，東京工業大学にて，電波伝搬，スマート・アンテナ（Smart Antenna）やソフトウェア無線（Software Defined Radio）に関わる研究に従事．

第1章 Appendix

アダプティブ・アレイ信号処理とFPGA

Minseok Kim

高いスループットを達成するには，アダプティブ・アレイ・アンテナやMIMOシステムなどの複数アンテナを用いる信号処理技術の導入が必須である．アダプティブ・アレイ信号処理における処理負荷について簡単な例を示し，FPGAによる信号処理のメリットについて説明する．（筆者）

1．計算負荷の算出

例えば，アンテナ数8本のアダプティブ・アレイ・アンテナ受信機における計算負荷を考えてみましょう(1)．ここで考慮するユーザの数は8（$K=8$）を想定します．

● 受信処理

受信機が中間周波数（IF）帯のディジタル・ダウン・コンバージョンを用いる場合，主にディジタルFIR（Finite Impulse Response）フィルタの処理を行います．問題を簡単にし，このときに必要な1秒当たり実数乗算の数［mult/s］を計算してみると，以下のようになります．

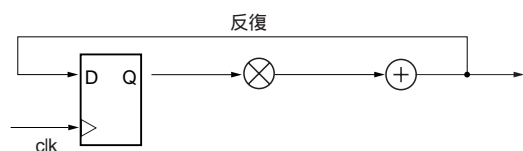
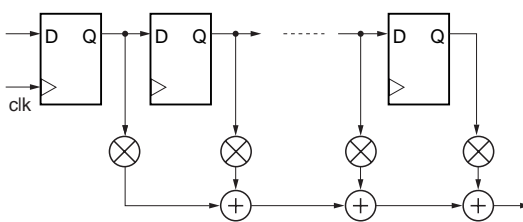
$$N_{FIR} = r_s \times n_{taps} \times (2 \times K) = 40 \times 10^6 \times 8 \times (2 \times 8) = 5120 \times 10^6 \quad \cdots\cdots(1)$$

（a）Single MAC
実現するには256回の反復が必要

（b）Multiple MAC
256個のMAC動作が1クロックで済む

図1　DSPとFPGAにおける256タップのFIRフィルタの実装

ここで，r_sはサンプリング・レート，n_{taps}はFIRフィルタのタップ数であり，それぞれ40MHzと少な目の8タップとしたら，5120×10^6となることが分かります．

● 重み係数の計算

アダプティブ・アレイ・アンテナの重み係数制御法として主に用いられているRLS（Recursive Least Square）処理を行う場合，実数乗算の数は$16K^2+16K+8$として知られています(9)．もし，重み係数の収束に16回の反復計算が必要であり，その重み計算を8ユーザに0.5msごとに処理する想定であれば，その負荷は以下のようになります．

$$N_{RLS} = r_u \times (16K^2+16K+8) = (8 \times 2000 \times 16) \times (16 \times 8^2 + 16 \times 8 + 8) = 297 \times 10^6 \quad \cdots\cdots(2)$$

ここで，r_uは重み係数の更新レートです．このときの乗算の数は297×10^6になります．

● 受信ビームの形成（Beamforming）

重み係数が決定されたらユーザことにビーム形成を行います．これは受信データと重み係数の複素乗算になりますが，実数乗算の数に換算すると以下のように計算されます．

$$N_{BF} = 4 \times r_b \times L_{frame} \times K = 4 \times (8 \times 2000) \times 136 \times 8 = 70 \times 10^6 \quad \cdots\cdots(3)$$

ここで，r_bはビーム形成レート，L_{frame}はフレームの長さです．それぞれ1msと136シンボルとすると，要求される乗算の数は70×10^6になります．

このように，アダプティブ・アレイの信号処理には1秒当たり数千億～数兆回の乗算を行わなければならないことが分かります．高性能のDSP（Digital Signal Processor）を用いて実現することも考えられますが，並列処理を柔軟に実装可能なFPGAのメリットが生かせるところです．

FPGAでは複数の掛け算の並列構成が可能で，例えば10個の乗算を100MHzで動作させることで1GOPS（Giga Operation per Second）の性能が簡単に出ます．さらに動作検証後ASIC化することで消費電力やコストを低減できそうです．

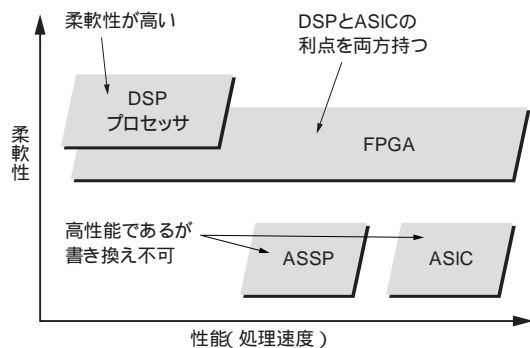



図2 信号処理デバイスの位置づけ

表1 FPGAとDSPの使い分け

処理	比較
単純/繰り返し処理	FPGA > DSP
複雑/高度な演算	FPGA < DSP
固定小数点演算	FPGA > DSP
浮動小数点演算	FPGA < DSP

2. FPGAによるディジタル信号処理

FPGAを用いたディジタル信号処理の実現は，フォン・ノイマン構造を持つDSPやCPUを用いてソフトウェア的に実現する方法と本質的に異なります．DSPやCPUの場合，作成したソフトウェアの命令(Instruction)を処理器(Processing Unit)が順次，メモリからロード，実行，データのストアを行うので，柔軟性の面では非常にメリットがあり汎用的です．しかし，構造的に一つ，あるいは二つの処理器を時間的に共有するため，特定のアプリケーションに最適化されてはいません．

FPGAは複数の積和演算器(MAC：Multiplier and Accumulator)をLE(Logic Element)や乗算器数の範囲内ならいくらでも並列して実装できるため，高い性能が得られます．256タップのFIRフィルタを実現する場合，DSPやCPUでは256回の乗算を256クロックのシリアルで行いますが，FPGAのパラレル処理では1クロックで256回の乗算が同時に計算されます(**図1**)．

さらに回路をASIC化することで，回路面積や動作スピード，消費電力を最適化できます．**図2**にDSP，FPGA，ASIC，ASSPの位置づけを，性能と柔軟性の関係で示します．信号処理面からいうと，FPGAは高い柔軟性と高い性能という点で欠かせない選択になりつつあります．FPGAは並列処理が可能な点ではDSPやCPUより優れていますが，高い精度を要求する浮動小数点計算や，高度なアルゴリズムを実装するには回路面積が莫大になり効率的ではありません．単純な繰り返し計算を同時に速く処理したい場合に適しているといえます(**表1**)．

表2 FPGA内蔵DSPブロックの数と最大性能

メーカ	ファミリ	乗算器の数	最大性能(MHz)
Altera社	Cyclone	なし	—
	Cyclone II	13～150(18×18)	180～260(9×9，18×18) 123～183(18ビット，4タップFIRフィルタ)
	Cyclone III	23～288(18×18)	180～260(9×9，18×18)
	Stratix	6～22 (DSPブロック数)	217～335(9×9) 175～278(18×18) 99～278(36×36) 175～278(18ビット，4タップFIRフィルタ)
	Stratix II	12～96 (DSPブロック数)	320～430(9×9) 305～450(18×18) 186～410(36×36) 305～410(18ビット，4タップFIRフィルタ)
	Stratix II GX	16～63 (DSPブロック数)	320～430(9×9) 305～450(18×18) 186～410(36×36) 305～410(18ビット，4タップFIRフィルタ)
	Stratix III	216～576 (18×18)	300～490(9×9) 300～490(12×12) 340～550(18×18) 270～440(36×36) 300～490(18ビット，MAC)
	Spartan-3	4～104(18×18)	～250
Xilinx社	Virtex-4 SX	128～512 (DSPブロック数)	～500
	Virtex-5 SXT	192～640 (DSPブロック数)	～550

最近は製品の試作段階だけでなく，米国Altera社のCycloneシリーズや米国Xilinx社のSpartan-3シリーズのように，量産を考慮した場合にもASICに匹敵するFPGA製品が次々市場に登場しています．最近のFPGAは，単なるプログラミング可能な論理ブロックだけではなく，あらかじめハード・ワイヤード論理で作られた専用の乗算器，メモリ・ブロック，クロック管理などの機能がサポートされています．このハード・マクロ専用乗算器を使うことで，一般の論理ブロックを消費せず，高性能の信号処理回路が実現できます．

表2は主要なFPGAのDSPブロックの数と最大性能をまとめたものです．

参考・引用*文献

(1) J. Litva and T. Lo, *Digital Beamforming in Wireless Communications*, Artech House Publishers, 1996.

Minseok Kim
東京工業大学